

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA  
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA Nº 5

## Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro



Sociedad Española  
de Geomorfología



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Editores: Juan José Durán Valsero,  
Manuel Montes Santiago,  
Alejandro Robador Moreno  
y Ángel Salazar Rincón



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España

# **Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro**

Actas de la XIV Reunión Nacional  
de Geomorfología  
Málaga, 22-25 de Junio de 2016

## **Editores**

Juan José Durán Valsero, Manuel Montes Santiago,  
Alejandro Robador Moreno y Ángel Salazar Rincón

Madrid, 2016

Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro / Juan José Durán Valsero, Manuel Montes Santiago, Alejandro Robador Moreno y Ángel Salazar Rincón, eds.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2016

768 pgs; ils; 24 cm.- (Geología y Geofísica; 5)  
ISBN 978-84-9138-013-9  
Geomorfología, España

Portada: Panorámica de El Torcal Alto (Antequera, Málaga).

Foto: J. J. Durán

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier otro sistema de almacenar información sin el previo permiso escrito del autor o editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

© INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID

NIPO: 72816018X

ISBN: 978-84-9138-013-9

Depósito Legal: M-21672-2016

Catálogo y venta de publicaciones de la Administración General del Estado en:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

---

Imprime: Lerko Print S.A.

Paseo de la Castellana, 121

28046 Madrid

Impreso en papel ecológico



	Pág.
<i>M.T. Rico, Y. Sánchez-Moya, A. Sopena, V. Thorndycraft, A. Díez-Herrero y M.A. Perucha</i> .....	291
Cuantificación de incertidumbres en la reconstrucción hidráulica bidimensional de paleoinundaciones a velocidades subcríticas en valles confinados (río Guadalquivir). <i>P. Bohórquez y F. García-García</i> .....	299
Dinámica geomorfológica de un cauce efímero afectado por extracción de gravas. <i>M. Calle, P. Alho y G. Benito</i> .....	307
Las avenidas torrenciales de los barrancos de Portainé, Reguerals y Ramiosa (Pirineo Central): evolución de las cuencas y dinámica torrencial. <i>G. Furdada, M. Génova, M. Guinau, A. Victoriano, G. Khazaradze, A. Díez-Herrero, J. Calvet</i> .....	315
Las terrazas del río Alagón. Dataciones por luminiscencia y significado en el contexto de la Depresión de Coria (Cáceres). <i>G. Garzón, R. Tejero, P. Fernández, J. Garrote</i> .....	323
Estimación inicial de la producción hidrosedimentaria en la cuenca hidrográfica del Guadalete (Cádiz, España). <i>M. Hamani, F.J. Gracia, J. Benavente y J.J. Gomiz</i> .....	331
Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca, periodo 1927 – 2014. <i>M. Llena, D. Vericat y J.A. Martínez-Casasnovas</i> .....	339
Hidroclimatología de las inundaciones históricas y paleocrecidas del río Duero en su tramo medio e internacional. <i>M.J. Machado, A. Medialdea, M. Barriendos y G. Benito</i> .....	349
El uso de la potencia hidráulica del río como indicador de procesos geomorfológicos. <i>V. Martínez-Fernández, M. González del Tánago y D. García de Jalón</i> .....	357
Erosión minera en la cuenca del arroyo Peñalén (Parque Natural del Alto Tajo, Guadalajara). <i>C. Martín-Moreno, J.F. Martín Duque, J.M. Nicolau, A. Muñoz, I. Zapico</i> .....	365
Estimación de los tiempos de concentración: implicaciones de la simplificación morfométrica en el análisis hidrológico de caudales de avenida fluvial. <i>L. Martins, A. Díez-Herrero, J.M. Bodoque, C. Bateira</i> .....	375
Versatilidad de la datación por luminiscencia en el estudio de suelos y depósitos de crecida. <i>A. Medialdea, G. Benito y K.J. Thomsen</i> .....	383
Datación preliminar por ESR de la secuencia de terrazas fluviales del valle del Arlanza (Sector NE de la Cuenca del Duero, Burgos). <i>D. Moreno, A. Benito-Calvo, C. Falguères, P. Voinchet, A. Pérez-González</i> .....	391
Cambios morfológicos en el cauce del río Serpis tras la construcción del embalse de Beniarrés (Alicante, 1958-2013). <i>A. Navarro, C. Sanchis-Ibor y F. Segura-Beltrán</i> ...	399
Cambios recientes en el patrón de inundaciones en la rambla de Nogalte (Murcia). <i>J. A. Ortega-Becerril, G. Garzón, M. Béjar-Pizarro y J.J. Martínez-Díaz</i> .....	407
Dataciones cosmogénicas en el cañón del Bajo Guadiana: evolución de la terraza rocosa e incisión del canal interno. <i>J.A. Ortega, G. Garzón, R. Tejero, A.S. Meriaux</i> .....	415
Geocronología de la actividad hidromagmática del maar de Cuelgaperros (Campo de Calatrava, Ciudad Real): nuevas aportaciones. <i>M. A. Poblete, S. Beato, J.L. Marino y J. Ruiz</i> .....	423



## **Erosión minera en la cuenca del arroyo Peñalén (Parque Natural del Alto Tajo, Guadalajara)**

### ***Mining erosion and environmental problems of the Peñalén stream catchment (Alto Tajo Natural Park, Guadalajara)***

**C. Martín-Moreno<sup>1</sup>, J.F. Martín Duque<sup>2</sup>, J.M. Nicolau<sup>3</sup>, A. Muñoz<sup>4</sup>, I. Zapico<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España). [crismartin@geo.ucm.es](mailto:crismartin@geo.ucm.es)

<sup>2</sup> Dpto. de Geodinámica e Instituto de Geociencias (CSIC, UCM), C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España). [josefco@ucm.es](mailto:josefco@ucm.es)

<sup>3</sup> Dpto. de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte s/n, 22071, Huesca (España). [nicolau@unizar.es](mailto:nicolau@unizar.es)

<sup>4</sup> Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España). [amunoz@geo.ucm.es](mailto:amunoz@geo.ucm.es)

<sup>5</sup> Dpto. de Geodinámica e Instituto de Geociencias (CSIC, UCM), C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España). [i.zapico@igeo.ucm-csic.es](mailto:i.zapico@igeo.ucm-csic.es)

**Resumen:** La cuenca de Peñalén se localiza en la Zona Periférica de Protección del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara). Esta cuenca posee laderas largas, de pendiente elevada. En ella se sitúa la mina inactiva Santa Engracia, con dos frentes de explotación. La severidad de los procesos erosivos, tanto en las laderas como en la mina, condicionó la construcción de una serie de diques de corrección hidrológica. Éstos fueron erigidos en tres periodos (1981, 1984 y 2009) con el objetivo de retener sedimentos y para ‘estabilizar’ cauces y laderas. En este trabajo se explican los procesos erosivos y el flujo de sedimentos de la cuenca; también se cuantifican la producción de sedimentos de las escombreras conectadas con la red fluvial. Para ello, se ha reconstruido un MDE que representa su topografía original, y se ha calculado el volumen de materiales erosionados. También se ha cubicado el volumen de sedimentos retenidos en dos diques mediante tomografía eléctrica. Finalmente, se han relacionado las precipitaciones ocurridas en el invierno 2009-2010 con el volumen de sedimentos retenido en los diques para este mismo periodo. Los resultados muestran un valor medio de erosión para las escombreras de 318 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, correspondiente a 24500 m<sup>3</sup> (34600 Mg). El volumen de sedimentos retenidos en los diques es de 13000 m<sup>3</sup> (19500 Mg), de los cuales una parte proceden de las laderas, y otra de las escombreras. El análisis de la precipitación y el relleno de los diques indica que unas precipitaciones no excepcionales colmataron los diques en aproximadamente un mes, siendo el volumen de sedimentos retenido de 4100 m<sup>3</sup> (6200 Mg). Estos resultados apuntan a una alta actividad erosiva ‘natural’, acentuada por la actividad minera. Todo ello se ha traducido en un incremento importante de la emisión de sedimentos desde esta cuenca hacia el río Tajo.

**Palabras clave:** diques de corrección hidrológica, erosión minera, impacto ambiental, procesos geomorfológicos activos, tomografía eléctrica.



**Abstract:** The Peñalén watershed, located in the buffer zone of the Alto Tajo Natural Park (Guadalajara, Spain) includes the Santa Engracia inactive mine, with two contour mining working areas. The severity of the erosive processes, both in natural slopes and mined areas, prompted the construction of a series of check dams in three periods (1981, 1984 and 2009). Their purpose was to trap sediments and to 'stabilize' both streams and slopes. The erosive processes and the flux of sediments within this watershed are explained in this work, having also quantified the erosion and sediment yield of the mine's spoil heaps connected with the fluvial network. The MDE of the original spoil heap topography was thus reconstructed, and the volume of the eroded materials was calculated. The volume of the trapped sediments in two check dams was determined using geophysics techniques (electrical imaging). Finally, the precipitation characteristics of the 2009-2010 winter were analyzed to relate them with the volume of the sediment trapped in the check dams during this same period of time. The results obtained show a high erosive activity, on average  $318 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$  corresponding to  $24500 \text{ m}^3$  ( $34600 \text{ Mg}$ ). The total volume of sediments trapped in the check dams is  $13000 \text{ m}^3$  ( $19500 \text{ Mg}$ ), part of it coming from the gullies and 'natural' slopes, and most of it from the mining spoil heaps. The analysis of the relationship between sediments trapped in the check dams and precipitation shows that unexceptional precipitation events were capable to generate the filling of the check dams  $4100 \text{ m}^3$  ( $6200 \text{ Mg}$ ) within approximately one month. These results point to a high 'natural' erosive activity, which has been highly accentuated by the mining activity. This has brought forwards a considerable increase in the volume of sediments to the Tajo River.

**Key words:** active geomorphologic processes, check dams, electrical imaging, environmental impact, mining erosion.

## INTRODUCCIÓN

En los estudios de erosión a nivel de cuenca, uno de los aspectos básicos es la identificación de las principales áreas fuente de sedimento.

La identificación de las áreas fuente se ha abordado con distintas técnicas dependiendo de la escala de estudio (p.e. escala de ladera y escala regional), y de los objetivos del estudio. Así, destacan aproximaciones realizadas a partir de información geográfica, fisiográfica, litológica y de usos del suelo, o la aplicación de modelos de erosión. Otros trabajos identifican estas áreas a partir de las características especiales de los sedimentos.

Las medidas directas de erosión se realizan mayoritariamente a pequeña escala, y

para un periodo concreto de tiempo, por lo que la estimación de la erosión *on-site* y la producción de sedimentos para una cuenca puede ser complicada. Esto se debe, principalmente, a que en una cuenca los procesos están interrelacionados (ocurren procesos 'en cascada'), y a la falta de información, especialmente cuando se abordan estudios a escala regional. Muchos autores, como alternativa a los problemas de disponibilidad de datos, han estudiado los sedimentos retenidos en lagos y embalses (estudios a escala regional) o los sedimentos retenidos en pequeños embalses o diques de corrección hidrológica (estudios de cuencas de menor tamaño, p.e. Romero-Díaz *et al.*, 2007).

En este estudio, continuación del trabajo Martín-Moreno *et al.* (2008), presentado en la X Reunión Nacional de Geomorfología, se



ha cuantificado la erosión y la producción de sedimentos para distintos contextos espaciales y temporales de la cuenca del arroyo Peñalén, situada en la Zona Periférica de Protección (ZPP) del Parque Natural del Alto Tajo. Primero, se ha cuantificado la erosión ocurrida en tres escombreras mineras conectadas a la red fluvial. Después se ha cubicado el volumen total de sedimentos retenido en dos diques de corrección hidrológica. También se ha relacionado la precipitación ocurrida durante el invierno de 2009-2010 con los sedimentos retenidos en los diques en este mismo periodo. El objetivo principal es realizar una aproximación a la cuantificación de la erosión y a los flujos de sedimentos de esta cuenca.

### ZONA DE ESTUDIO

La cuenca de Peñalén se sitúa en la ZPP del Parque Natural del Alto Tajo; este espacio también está incluido en la ZEPA Alto Tajo (ES0000092) y en el Geoparque Comarca de Molina-Alto Tajo, en la provincia de Guadalajara.

Este entorno se caracteriza por un paisaje de hoces y cañones encajados en plataformas y parameras (mesas), en el que destacan la calidad de las aguas de sus ríos y los ecosistemas ligados al medio fluvial. La litología la componen esencialmente rocas calizas y arenas silíceas con niveles de caolín (Facies Utrillas). En las mesas, los suelos son principalmente luvisoles crómicos y cambisoles calcáricos; las laderas están cubiertas por coluvión carbonático, con cambisoles calcáreos. El clima es mediterráneo templado con veranos secos y suaves con influencia continental. La precipitación media anual es de 783 mm y la temperatura de 10 °C. En cuanto a la vegetación y a los usos del suelo predominan los pinares (*Pinus nigra ssp. Salzmannii*) y quejigares (*Quercus faginea*) y minoritariamente las zonas de cultivo de secano.

La cuenca de Peñalén tiene un área de 192 ha. La altitud máxima es de 1443 m y la mínima de 1051 m (desnivel absoluto de 392 m, en unos 3 km). Este gran desnivel y su localización en el borde de la paramera favorecen los procesos geomorfológicos activos. El arroyo de Peñalén, de 1,7 km de longitud, es tributario del arroyo Merdero, el cual, a su vez, es afluente del río Tajo. El arroyo Peñalén en su trayectoria salva un desnivel de 243 m, por lo que en su perfil longitudinal tiene una pendiente media elevada (~14%).

En esta cuenca se sitúa el pueblo de Peñalén y la mina inactiva Santa Engracia, con dos frentes de explotación (frente del cementerio y frente de la pista a Poveda) (Figura 1). El frente del cementerio fue el primero en abrirse, en la década de 1970. Tras unos años de explotación, los trabajos cesaron, volviendo a iniciarse en 1982, y abriéndose también el frente de la pista a Poveda. Poco después se dejó de trabajar en el frente del cementerio, y se continuó la actividad en el frente de la pista, hasta 1990.

Esta cuenca ha sido objeto de 3 actuaciones de corrección hidrológica, las cuales consistieron en la construcción de una serie de diques de gaviones.

La primera actuación se ejecutó en 1981 y consistió en la construcción 4 diques de 2 m de alto en pequeños arroyos y un dique de 4 metros de altura en el cauce del arroyo Peñalén, justo antes de su desembocadura al arroyo Merdero. La segunda actuación se realizó en 1984, para cuando los diques ya estaban colmatados, por lo que se recrecieron otros 4 metros el dique del arroyo Peñalén (D1), alcanzando una altura total de 8 m. En el invierno del 2009-2010 se llevó a cabo la tercera actuación; en ella se vació parcialmente el dique de 8 m, y se construyó otro de 4 m aguas arriba de éste (D2). En un periodo de 1 mes, aproximadamente, estos diques fueron colmatados (ver Figura 1).

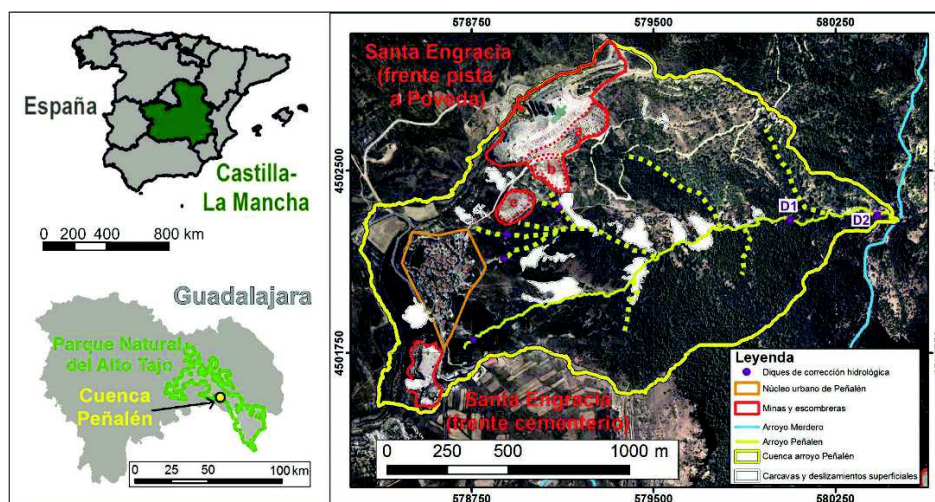


FIGURA 1. Localización de la Cuenca del arroyo Peñalén. Se incluye la ubicación de los diques. Las letras a, b, c, indican las escombreras exteriores de la mina Santa Engracia estudiadas en este trabajo

## METODOLOGÍA

Las escombreras tenían originalmente topografía en bancales, pero debido a la erosión hídrica se formó sobre ellas una red de regueros y cárcavas. Para calcular el material erosionado por este proceso, en primer lugar, y a partir de datos LIDAR (densidad de 0,5 puntos  $m^{-2}$ , vuelo LIDAR 2009 del PNOA) se construyó una red de triángulos irregulares (*Triangulated Irregular Network*, TIN) que representa la topografía actual de las escombreras. A partir de este TIN se construyeron curvas de nivel de equidistancia 1 m (todo ello con el *software* ArcGIS 10.1). Estas curvas fueron editadas manualmente para reconstruir la topografía 'original' en bancales. Para ello se tomó como referencia unas fotografías de 1990, donde pueden verse los bancales, así como la identificación de los restos originales de dichos bancales, reconocidos en los interfluvios de las cárcavas tanto en campo como en el TIN que representa la topografía actual. Una vez reconstruida la topografía 'original', se construyó un nuevo TIN. Los dos TIN (1,

escombrera que reconstruye el punto de partida, sin regueros ni cárcavas; y 2, escombreras con regueros y cárcavas, aspecto actual) fueron comparados geométricamente mediante el comando "*Surface difference*" de ArcGIS, obteniendo la diferencia de volumen existente entre los dos. El volumen obtenido ( $m^3$ ) se transformó en masa de sedimento erosionado (Mg), multiplicándolo por la densidad aparente de las arenas ( $1,41 g cm^{-3}$ ). La tasa media de material erosionado en términos de masa por área y unidad de tiempo ( $Mg ha^{-1} año^{-1}$ ), se calculó relacionando la cantidad de sedimentos erosionados con la superficie de cada escombrera y se dividió por los 19 años transcurridos entre 1990 y 2009.

Para calcular el volumen de sedimentos retenido en los dos diques de corrección hidrológica (diques 1 y 2), se usaron técnicas geofísicas (tomografía eléctrica). La campaña de campo para la toma de datos se realizó en julio de 2012. Estas técnicas geofísicas introducen corriente eléctrica continua (*direct current*, DC) en los materiales geológicos del



subsuelo, mediante electrodos que se clavan en la superficie. El método se basa en la medida de variaciones de potenciales entre pares de electrodos consecutivos mientras se transmite la corriente continua. El parámetro calculado es la resistividad aparente ( $\rho_{ap}$ ):

$$\rho_{ap} = K \frac{\Delta V}{I}$$

$\Delta V$  = diferencia de potencial entre un par de electrodos

$I$  = intensidad de corriente introducida en el terreno

$K$  = constante de configuración geométrica, que depende de las distancias entre los electrodos.

El valor de la resistividad (en  $\Omega$  m), depende de la composición de los materiales, del contenido en fluidos, y de la naturaleza de los mismos. Así, la interpretación de los valores de resistividad sigue dos pasos: 1) interpretación física, obteniéndose un modelo físico; y 2) interpretación geológica de este modelo.

Se realizaron un total de 5 perfiles de tomografía eléctrica, 2 en el dique 1 y 3 en el dique 2. El sistema de tomografía eléctrica usado fue el RESECS DMT, con 48 electrodos. La separación entre electrodos fue de 2,5 m. El dispositivo electródico usado fue el de Schlumberger. Se realizaron ciclos de inyección con polaridad cambiada y un voltaje de 120 V. Para cada inyección se calculó el error y se observó la variación en la desviación estándar. El método de inversión usado para la calcular la distribución de las resistividades reales en profundidad y su interpretación posterior fue el código RES2DINV, con elementos finitos de cuatro nodos. Después, se interpretaron las secciones de tomografía eléctrica, y se identificó el contacto entre el sustrato y el relleno de los diques. A continuación, se calculó el volumen de sedimentos retenidos en cada dique.

Para ello se asignaron coordenadas en XYZ a cada valor de espesor de relleno mediante el *software* Surfer 10. A estos datos se les añadió el límite cartográfico de relleno (superficie del vaso del diques) como condición de contorno (espesor = 0 m) y se interpolaron, mediante el método de mínima curvatura, a una malla regular de 1 m, para construir el mapa de isopacas de relleno de cada dique.

Entre el 10-12-2009 y el 18-01-2010 se produjeron en esta zona precipitaciones continuadas (frentes fríos invernales), que originaron procesos erosivos, movilizaron materiales y rellenaron los diques 1 y 2 (Figura 2). Dado este suceso, se relacionaron las características de la precipitación con el volumen de sedimentos retenidos para este periodo.

La precipitación fue registrada por un pluviógrafo automático (0,2 mm/pulso) con data logger *HOB0 Event*. A partir de los datos registrados se calculó: la precipitación total acumulada (mm), el periodo de retorno en años (T), la intensidad máxima en 24 horas ( $\text{mm h}^{-1}$ ), la intensidad máxima en 60 minutos ( $I_{60}$ ) y la intensidad máxima en 30 minutos ( $I_{30}$ ) ( $\text{mm h}^{-1}$ ). Para calcular el periodo de retorno se analizaron las series históricas de las estaciones pluviométricas de Peñalén, Zaorejas y Beteta. Para ello se usó la aplicación CHAC (CEDEX, 2004). La distribución de frecuencias empleada fue la GEV (*General Extreme Values*) con el método de Máxima Verosimilitud. El periodo de retorno se estimó de forma gráfica, usando las curvas GEV calculadas para cada estación.

El volumen de los sedimentos retenidos en los diques para este mismo periodo se calculó a partir de las secciones de tomografía eléctrica, teniendo en cuenta que el dique 1, cuando se produjeron las precipitaciones estaba sin terminar (sólo tenía 3 m de altura). En el caso del dique 2, el volumen retenido corresponde

al espacio vaciado durante la tercera actuación de corrección hidrológica, es decir, el correspondiente a un metro de profundidad. Para hacer estos cálculos se usó el *software* Surfer 10. El volumen obtenido se multiplicó por la densidad aparente de los materiales para calcular su masa (Mg). Conociendo el área de la cuenca, se pudo calcular la producción de sedimentos para este periodo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).



FIGURA 2. Aspecto de los diques 1 y 2 antes y después de las precipitaciones ocurridas entre el 10-12-2009 y el 18-01-2010

## RESULTADOS

Para la escombrera (a) en la Figura 1, el volumen de sedimentos erosionados desde 1990 hasta 2009 fue de  $11400 \text{ m}^3$ , correspondiente a una cantidad de sedimento de 16100 Mg. Teniendo en cuenta que la superficie de la escombrera es de 2,64 ha y que han pasado 19 años, la tasa media de erosión anual es de  $322 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Para la escombrera (b), el volumen de sedimentos erosionado fue de  $8300 \text{ m}^3$ , correspondiente a 11700 Mg. Dado que su superficie es de 1,82 ha, la tasa media de erosión anual es de  $338 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . En el caso de la escombrera (c), el volumen de sedimentos erosionado fue de  $4800 \text{ m}^3$ , (6800 Mg) como su superficie es 1,21 ha, la tasa media de erosión anual es de  $295 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

En total se ha erosionado de las escombreras un volumen, mínimo, de  $24600 \text{ m}^3$ , con una masa de 34600 Mg. Por tanto, la tasa media de erosión anual en estos 19 años es de  $318 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

Según las tomografías eléctricas, el espesor del relleno en el dique 1 alcanza los 5 m. Los materiales de relleno presentan resistividades más altas que los materiales que conforman el vaso del dique. Esto se explica porque el sustrato son las arenas de Utrillas, materiales consolidados, mientras que los materiales de relleno son arenas, gravas y fragmentos de rocas carbonatadas con mayor porosidad, lo que se traduce en resistividades mayores ( $> 160 \Omega \text{ m}$ , Figura 3). En el caso del dique 2, la profundidad máxima de relleno es de unos 9 m. La pendiente de la superficie de contacto entre el relleno y el sustrato es constante aguas arriba del dique, mientras que en la zona más próxima al dique varía bruscamente, aumentando el espesor de los sedimentos. Este cambio en el perfil longitudinal del cauce fue aprovechado para la construcción del dique. El dique 2 se apoya sobre materiales carbonatados, por lo que en este caso los sedimentos de relleno tienen valores de resistividad más bajos que el sustrato ( $< 100 \Omega \text{ m}$ , Figura 3). El volumen de sedimentos retenido calculado para el dique 1 es de  $2700 \text{ m}^3$ , equivalente a 4100 Mg. El dique 2 tiene un volumen de sedimentos retenido de  $10300 \text{ m}^3$ , 15400 Mg (Tabla I).

La precipitación total registrada entre el 10-12-2009 y 18-01-2010, fue de 351 mm, siendo su periodo de retorno de entre 25 y 30 años, estimado de forma gráfica a partir de las curvas GEV de las estaciones de Beteta, Zao-rejas y Peñalén. La intensidad máxima en 24 horas fue de 49 mm, la  $I_{60}$  fue de  $9,4 \text{ mm h}^{-1}$  y la  $I_{30}$  de  $12 \text{ mm h}^{-1}$ .

Para este periodo, el dique 1 retuvo 1100  $\text{m}^3$  sedimentos, (1600 Mg) y el dique 2 3100

m<sup>3</sup> (4600 Mg). Teniendo en cuenta que el área de la cuenca que vierte a la red hidrológica es de 173 ha, para este periodo la tasa de producción de sedimentos sería de 36 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (Tabla I).

Dique	Invierno 2009-2010		Sedimentos totales retenidos	
	Vol. (m <sup>3</sup> )	Masa (Mg)	Vol. (m <sup>3</sup> )	Masa (Mg)
Dique 1	1100	1600	2800	4100
Dique 2	3100	4600	10300	15400
Total	4100	6200	13100	19500

TABLA I. Volumen y masa de los sedimentos retenidos en los diques 1 y 2 para el periodo 10-12-2009 a 18-01-2010 y totales

## DISCUSIÓN

La tasa de erosión media de las escombreras es muy elevada: 318 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, aunque son valores similares a los registrados en otros ambientes mineros sujetos a erosión elevada. Las causas de esta intensidad de erosión son múltiples: 1) las escombreras se construyeron con materiales fácilmente erosionables (estériles poco cohesivos); 2) se construyeron mediante vertido directo sobre unas laderas de gran longitud y elevada pendiente; y 3) no se aplicaron medidas eficientes de restauración.

La incisión de regueros y cárcavas, se inició casi al mismo tiempo que las escombreras eran construidas.

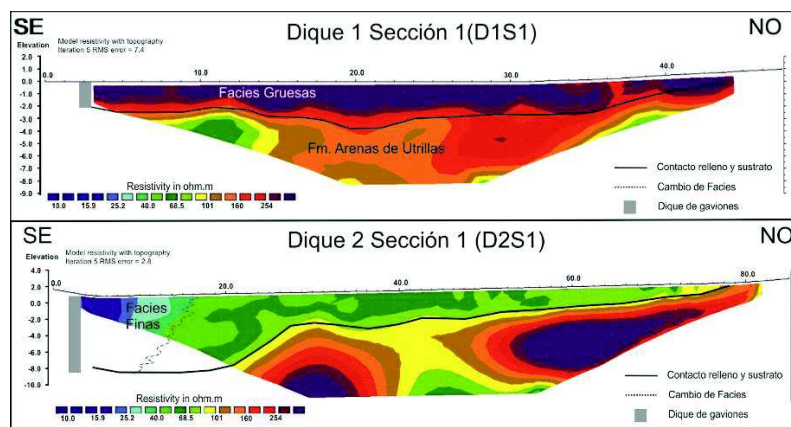


FIGURA 3. Secciones de tomografía eléctrica interpretadas. D1S1=Dique 1 Sección 1, D2S2=Dique 2, Sección 2

Éstas sólo se remodelaron mediante terrazas cuando fueron terminadas, en 1990, extendiéndose sobre la superficie de las bermas un sustrato coluvionar, que fue objeto de una fallida revegetación posterior.

Los diques han retenido sedimentos procedentes de: 1) las zonas mineras conectadas con la red fluvial; 2) las cárcavas y las zonas sujetas a deslizamientos superficiales; y 3) el

resto de la superficie de la cuenca. Los casos 2 y 3, serían considerados como 'erosión natural'. No todos los sedimentos erosionados en la cuenca habrán llegado a los diques, algunos de ellos habrán quedado retenidos en irregularidades de la cuenca. Por otro lado, el volumen de sedimentos erosionado podría ser superior al medido en los diques, dado que éstos quedaron colmatados, y parte del material movilizado pudo ir aguas abajo.



El volumen de los materiales erosionados en las escombreras, para 19 años, es de 24600 m<sup>3</sup>, una media de 1300 m<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>. El volumen total de sedimentos retenidos en los diques es de 13000 m<sup>3</sup>, por lo que si las tasas de erosión de las escombreras fueran constantes, los diques se colmarían en 10 años, pero no fue así, se rellenaron antes. Considerando además que la cuenca tiene otras áreas fuente de sedimento, la capacidad de retención de los diques es mucho menor que la producción de sedimentos de la cuenca, y que por tanto, su efectividad para el control de la sedimentación es muy limitada.

Se considera que la precipitación analizada (periodo 10-12-2009 a 18-01-2010), causante del relleno de los diques, no es excepcional, ya que su periodo de retorno es de 25 a 30 años. Las intensidades registradas tampoco parecen demasiado elevadas. Por tanto, se considera que la erosión y emisión de los sedimentos para este periodo de estudio, se debió al efecto de precipitaciones continuadas, que saturaron el suelo.

Los valores de tasas de producción de sedimentos obtenido (35 Mg ha<sup>-1</sup>, para un mes y 318 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) es mucho mayor que el valor de erosión máximo tolerable aceptado de forma general (11,2 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>). Para interpretar estos valores, es importante tener en cuenta que la mayoría de la superficie de la cuenca tiene una erosión objetivamente baja, por poseer una densa cubierta vegetal, por lo que el material procederá principalmente de cárcavas y escombreras.

## CONCLUSIONES

La cuenca de Peñalén posee una elevada efectividad de los procesos erosivos y de flujo de sedimentos hacia el río Tajo. Todo ello parece estar condicionado por una elevadísima energía del relieve y por la existencia de aflo-

ramientos de zonas de sustrato natural muy fácilmente erosionable (cárcavas).

Los diques de corrección hidrológica no tienen capacidad suficiente para retener todos los materiales erosionados en la cuenca, además de presentar limitaciones para la retención de sedimentos transportados en suspensión. Esto pone de manifiesto su limitada efectividad para el control de la erosión y del impacto hidrológico de la cuenca.

Se ha observado que los eventos de precipitación continuada, como el ocurrido entre el 10-12-2009 y el 18-01-2010, con alternancia de nevadas y lluvias, ocasionan una importante movilización de sedimentos (35 Mg ha<sup>-1</sup>), produciéndose un proceso erosivo muy importante aunque las lluvias no sean muy intensas.

La mina Santa Engracia (ambos frentes de explotación y sus escombreras) constituyen las fuentes 'no naturales' de sedimentos de esta cuenca, y aportan cantidades muy elevadas (318 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>). Por ello, cualquier actuación dirigida a 'restituir' un balance de escorrentía y sedimentos 'natural' en esta cuenca debería pasar, casi exclusivamente, por la actuación de restauración ecológica efectiva de estas zonas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa un resultado de los proyectos REMEDINAL-2 y 3 (S2009/AMB-1783 y S-2013/MAE-2719) y CGL2010-21754-C02-01. La contribución de I. Zapico forma parte de su beca predoctoral JAE-Predoc, CSIC. Los autores agradecen la ayuda de las muchas personas que han colaborado.

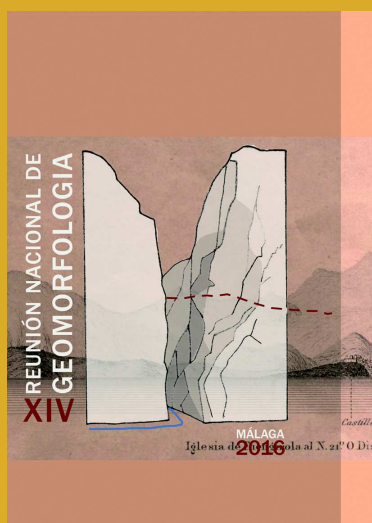
## REFERENCIAS

CEDEX. 2004. *CHAC, Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas*. Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.



- Ministerios de Fomento y de Medio Ambiente.
- Martín Moreno, C., Zapico, I., Nicolau, J.M., Martín Duque, J.F., Lucía, A y Sanz, M.A. 2008. Geomorfología y gestión del Parque Natural del Alto Tajo (2). Estimación de la emisión de sedimentos de la cuenca del arroyo Peñalén mediante RUSLE 1.06. En: Benavente, J. y Gracia, F.J. (Eds.) *Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008*, SEG, Cádiz, 463-46.
- Romero-Díaz, A., Alonso-Sarriá, F., Martínez-Lloris, M. 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena*, 71 (1), 172-178.





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España